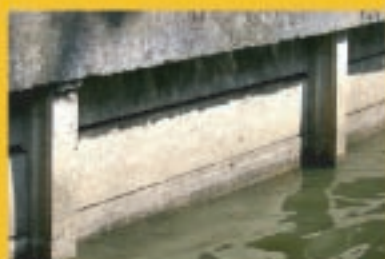


มยผ. 1332-50

**มาตรฐานงานคอนกรีต
เมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน**



**กรมโยธาธิการและผังเมือง
กระทรวงมหาดไทย
พ.ศ. 2550**

มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน

ส่วนที่ 1 ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานงานคอนกรีตนี้ ครอบคลุมถึงงานคอนกรีตทั่วไป ยกเว้นงานคอนกรีตชนิดพิเศษบางชนิดที่มีการใช้วัสดุพิเศษ เช่น โพลีเมอร์คอนกรีต คอนกรีตมวลเบา คอนกรีตมวลหนัก คอนกรีตผสมไฟเบอร์ เป็นต้น
- 1.2 มาตรฐานนี้ใช้หน่วย SI (International System Units) เป็นหลัก และใช้ค่าการแปลงหน่วยของแรง 1 กิโลกรัมแรงเท่ากับ 9.806 นิวตัน
- 1.3 มาตรฐานนี้ไม่ได้ครอบคลุมทุกชนิดของปัญหาความคงทน ดังนั้น ผู้ปฏิบัติตามมาตรฐานจำเป็นต้องใช้ข้อกำหนดหรือมาตรฐานอื่นที่เป็นที่ยอมรับสำหรับประกอบในการพิจารณาชนิดปัญหาความคงทนที่ไม่ได้ครอบคลุม

ส่วนที่ 2 นิยามและสัญลักษณ์

2.1 นิยาม

“การเสื่อมสภาพ (Deterioration)” หมายถึง การเปลี่ยนสภาพของวัสดุ เนื่องจากแรง สิ่งแวดล้อมหรืออิทธิพลภายใน ทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลง (เช่น การแตกร้าว การหลุดร่อน เป็นต้น)

“การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)” หมายถึง การหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้นจากคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจเป็นการเปลี่ยนแปลงด้านความยาวหรือปริมาตร

“การหดตัวแบบออโตจีเนียส (Autogenous Shrinkage)” หมายถึง ผลรวมของการหดตัวทางเคมีที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Chemical Shrinkage) และการหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างกะปิลลารีในเพสต์ ทำให้เกิดแรงดึงกะปิลลารี (Capillary Tension) ขึ้นในช่องว่างกะปิลลารี ซึ่งมีผลให้คอนกรีตหดตัว (Physical Shrinkage due to Self-desiccation) ทั้งนี้ไม่รวมการสูญเสียความชื้นให้กับสิ่งแวดล้อม

“ความคงทน (Durability)” หมายถึง ความสามารถของคอนกรีตในการต้านทานการเสื่อมสภาพ

“ความลึกคาร์บอนเนชัน (Carbonation Depth)” หมายถึง ระยะที่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮดรอกไซด์หรือออกไซด์เพื่อสร้างคาร์บอนเตในเพสต์ มอร์ตาร์ หรือคอนกรีต โดยวัดจากผิวคอนกรีต

“ปลอดการบำรุงรักษา (Maintenance-Free)” หมายถึง การที่ไม่ต้องทำการซ่อมแซมหรือบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีต

“ระยะหุ้มเหล็กเสริม” หมายถึง ระยะที่วัดจากผิวคอนกรีตถึงผิวนอกสุดของเหล็กปลอกเคียว หรือเหล็กปลอกเกลียว หรือเหล็กผูกตั้ง ในกรณีไม่มีเหล็กดังกล่าว ให้วัดถึงผิวของเหล็กเสริมที่อยู่ใกล้ผิวนอกสุด

“วัสดุประสาน (Binder)” หมายถึง วัสดุที่ใช้ประสานมวลรวมเข้าด้วยกัน อาจเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรต สารปอซโซลาน หรือผลผลิตจากการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ หรือปูนขาวกับซิลิกาที่ไวต่อกิริยา และอาจหมายถึงวัสดุประเภทแอสฟัลท์ เรซิน หรือวัสดุอื่นๆ ที่ก่อตัวเป็นคอนกรีต มอร์ตาร์

“อายุการใช้งาน (Service Life)” หมายถึง ระยะเวลาในการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตโดยที่โครงสร้างคอนกรีตดังกล่าวยังมีความแข็งแรงและความปลอดภัยในระดับที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบได้

2.2 สัญลักษณ์

B	=	น้ำหนักวัสดุประสานในส่วนผสมคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร หน่วยเป็นกิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
C_0	=	ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป หน่วยเป็นมิลลิเมตร
Cl_d	=	ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริม โดยเป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่แพร่มาจากสภาพแวดล้อมของโครงสร้าง หน่วยเป็นร้อยละ โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
Cl_{do}	=	ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่บริเวณผิวเหล็กเสริม โดยเป็นคลอไรด์ส่วนที่ผสมอยู่ในคอนกรีตตั้งแต่แรก เช่น จากการใช้ทรายทะเล ใช้น้ำกร่อย หรือใช้สารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ด้วยในการผลิตคอนกรีต หน่วยเป็นร้อยละ โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
Cl_{lim}	=	ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิมได้ หน่วยเป็นร้อยละ โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
C_{min}	=	ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด หน่วยเป็นมิลลิเมตร
Cl_s	=	ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต หน่วยเป็นกิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
D_a	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (Apparent Chloride Diffusion Coefficient) หน่วยเป็นตารางเซนติเมตร/ปี
D_k	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ (Apparent Chloride Diffusion Coefficient) ในคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว หน่วยเป็นตารางเซนติเมตร/ปี
D_o	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ (Apparent Chloride Diffusion Coefficient) ในคอนกรีตแตกร้าว หน่วยเป็นตารางเซนติเมตร/ปี
f'_c	=	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต หน่วยเป็นเมกะปาสกาล
$f'_c(28)$	=	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน หน่วยเป็นเมกะปาสกาล
k	=	สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น หน่วยเป็นมิลลิเมตร/ $\sqrt{\text{ปี}}$
k_r	=	ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในวัสดุประสาน (แคลเซียมไฮดรอกไซด์ 2g และ 2x ตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ ว.ส.ท. 1014-46)

l	= ระยะห่างโดยเฉลี่ยของรอยแตกร้าว (Crack Spacing) หน่วยเป็นมิลลิเมตร
RH	= ความชื้นสัมพัทธ์ หน่วยเป็นร้อยละ
S	= พื้นที่ผิวซึ่งสัมผัสอากาศของโครงสร้างคอนกรีต หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร
t	= อายุของคอนกรีตที่ต้องการคำนวณค่าการหดตัว ที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับอุณหภูมิมาตรฐาน 20°C หน่วยเป็นวัน
t_c	= อายุของคอนกรีตขณะเผชิญการแห้งที่ได้รับการปรับแก้เนื่องจากผลของอุณหภูมิ หน่วยเป็นวัน
t_0	= อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มเผชิญกับการแห้ง ที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับอุณหภูมิมาตรฐาน 20°C หน่วยเป็นวัน
t_{0c}	= อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มเผชิญการแห้งที่ได้รับการปรับแก้เนื่องจากผลของอุณหภูมิ หน่วยเป็นวัน
t_r	= อายุการใช้งานของคอนกรีตที่ต้องการ หน่วยเป็นปี
t_s	= ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (ปกติ ระหว่าง 0 ถึง 1 วัน) ที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับอุณหภูมิมาตรฐาน 20°C หน่วยเป็นวัน
Δt_i	= จำนวนวันที่มีอุณหภูมิเท่ากับ T_i หน่วยเป็นวัน
T_i	= อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมในช่วงเวลา Δt_i หน่วยเป็นองศาเซลเซียส
V	= ปริมาตรของโครงสร้างคอนกรีต หน่วยเป็นลูกบาศก์มิลลิเมตร
V/S	= อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวซึ่งสัมผัสอากาศของโครงสร้างคอนกรีต หน่วยเป็นมิลลิเมตร
W	= ปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต หน่วยเป็นกิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
w	= ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว หน่วยเป็นมิลลิเมตร
w_a	= ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวที่มากที่สุดที่ยอมให้ได้ หน่วยเป็นมิลลิเมตร
w/b	= อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
X_c	= ความลึกคาร์บอนเนชั่นวัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ หน่วยเป็นมิลลิเมตร
α	= ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม
α_c	= ตัวแปรซึ่งแสดงผลของประเภทปูนซีเมนต์ ใช้ในการคำนวณหาค่าการหดตัวแบบแห้งสุดท้าย
α_1	= สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น เช่น ฝน
α_2	= สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น
β	= ตัวแปรซึ่งแสดงถึงการแปรผันตามเวลาของการหดตัวแบบแห้ง

γ_b	=	ตัวแปรซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของชนิดปูนซีเมนต์และวัสดุประสาน ใช้ในการคำนวณหาค่าการหดตัวแบบอโตจีเนียส
γ_c	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับการแพร่ของคลอไรด์
γ_i	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย
$\varepsilon'_{as}(t)$	=	ค่าการหดตัวแบบอโตจีเนียสของคอนกรีตตั้งแต่เริ่มก่อตัวจนถึงอายุ t หน่วยเป็นไมครอน หรือ $\times 10^{-6}$
$\varepsilon'_{as}(t, t_0)$	=	ค่าการหดตัวแบบอโตจีเนียสของคอนกรีตระหว่างอายุ t_0 ถึง t หน่วยเป็นไมครอน หรือ $\times 10^{-6}$
$\varepsilon'_{as\infty}$	=	ค่าการหดตัวแบบอโตจีเนียสสุดท้าย หน่วยเป็นไมครอน หรือ $\times 10^{-6}$
$\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$	=	ค่าการหดตัวของคอนกรีตระหว่างอายุ t_0 ถึง t หน่วยเป็นไมครอน หรือ $\times 10^{-6}$
$\varepsilon'_{ds}(t, t_0)$	=	ค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตระหว่างอายุ t_0 ถึง t หน่วยเป็นไมครอน หรือ $\times 10^{-6}$
$\varepsilon'_{ds\infty}$	=	ค่าการหดตัวแบบแห้งสุดท้าย หน่วยเป็นไมครอน หรือ $\times 10^{-6}$
ε'_{sh}	=	ค่าการหดตัวสุดท้าย หน่วยเป็นไมครอน หรือ $\times 10^{-6}$

ส่วนที่ 3 คุณสมบัติของคอนกรีตเมื่อพิจารณาเรื่องความคงทน

3.1 คุณสมบัติของคอนกรีตในสถานะต่างๆ

3.1.1 คอนกรีตสด

คอนกรีตสดควรมีความสามารถในการเทได้และเติมเต็มเข้าแบบได้ดี มีค่าการสูญเสียความสามารถในการเทได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ความสามารถในการเทได้ที่ดี หมายถึง

- (ก) มีความสามารถในการเทได้ หรือการไหล ที่เหมาะสมกับการก่อสร้างนั้นๆ
- (ข) ไม่แยกตัว
- (ค) ไม่เกิดการติดขัดเนื่องจากหินกองรวมกันที่ส่วนหนึ่งส่วนใดของแบบหรือเหล็กเสริมในระหว่างเท

3.1.2 คอนกรีตในสถานะพลาสติก

คอนกรีตในสถานะพลาสติก ควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

- (ก) ไม่มีการแยกน้ำ หรือมีเพียงเล็กน้อย
- (ข) ไม่มีการทรุดตัวแบบพลาสติก หรือมีเพียงเล็กน้อย
- (ค) ไม่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก
- (ง) แต่งผิวง่าย

3.1.3 คอนกรีตอายุต้น

คอนกรีตอายุต้น ควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

- (ก) ไม่มีการหดตัวแบบบอโตจีเนียส หรือมีเพียงเล็กน้อย โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาการแตกร้าวเนื่องมาจากหน่วยแรงยึดรั้งที่มีสาเหตุมาจากการหดตัวแบบบอโตจีเนียส
- (ข) ไม่มีการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ
- (ค) มีกำลังอัดที่อายุต้นเพียงพอ

3.1.4 คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วควรมีคุณสมบัติตามที่ต้องการในระยะยาว คุณสมบัติดังกล่าว ได้แก่

- (ก) คุณสมบัติทางกล

คุณสมบัติทางกล ได้แก่ กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น คอนกรีตควรมีกำลังอัดมากพอที่จะรับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบไว้โดยมีตัวคูณความปลอดภัยที่เหมาะสม โมดูลัสยืดหยุ่นไม่ควรมีค่าน้อยกว่าที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง

- (ข) คุณสมบัติด้านความคงทน

คุณลักษณะด้านความคงทนของคอนกรีตสำหรับอายุการใช้งานในระยะยาวขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่คอนกรีตจะต้องเผชิญ คอนกรีตจะต้องถูกออกแบบให้มีคุณภาพสูง มีการซึมผ่านของสารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตหรือเหล็กเสริมต่ำ และมีระยะหุ้มเหล็กเสริมที่เพียงพอ ในการเผชิญกับสภาพแวดล้อมชนิดและระดับต่าง ๆ เพื่อให้คอนกรีตมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพในสภาพแวดล้อมของการใช้งานและสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ โดยพิจารณาตามหัวข้อต่อไปนี้

- 1) การขยายตัวในสภาวะเปียก

คอนกรีตต้องไม่ขยายตัวมากเกินไปในสภาวะเปียก ค่าการขยายตัวที่ได้จากการทดสอบมาตรฐานต้องมีค่าไม่สูงจนก่อให้เกิดผลเสียต่อองค์อาคารที่ติดกัน ค่าการขยายตัว (คิดเป็นร้อยละของความยาวของชิ้นทดสอบเริ่มต้น) ของชิ้นทดสอบที่ได้จากการทดสอบมาตรฐานต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด ในระยะเวลาที่กำหนด

- 2) การหดตัวแบบแห้ง

คอนกรีตต้องไม่หดตัวมากเกินไปจนก่อให้เกิดรอยร้าวที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ค่าการหดตัวของคอนกรีตต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของการยึดรั้ง กำลังรับแรงดึง หรือความต้านทานการแตกร้าวของคอนกรีต และคุณสมบัติของคอนกรีตอื่นๆ เช่น การล้า เป็นต้น

3) คาร์บอนชั้น

ความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตมาตรฐานทดสอบโดยวิธีเร่ง (Standard Accelerated Test) ต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด ค่าดังกล่าวกำหนดโดยที่ความลึกคาร์บอนชั้นต้องไม่เข้าไปถึงตำแหน่งเหล็กเสริมชั้นนอกสุดก่อนอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาที่ได้ออกแบบไว้

4) การเป็นสนิมของเหล็กเสริม

คอนกรีตควรมีการซึมผ่านต่ำเพื่อจำกัดการเข้าไปของน้ำ ก๊าซ สารละลาย และไอออน เพื่อเป็นการป้องกันเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งอาจประเมินการซึมผ่านโดยใช้การทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ ค่าการซึมผ่านของน้ำต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด ค่าการซึมผ่านของน้ำที่กำหนดอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามระยะหุ้มเหล็กเสริม คอนกรีตที่มีระยะหุ้มมาก อาจกำหนดค่าการซึมผ่านของน้ำสูงขึ้น การกำหนดค่าต้องคำนึงถึงปริมาณคลอไรด์ด้วย โดยที่ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ ณ ตำแหน่งเหล็กเสริมชั้นนอกสุดต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด

5) ปฏิกริยาระหว่างด่างกับมวลรวม

คอนกรีตต้องไม่มีความเสี่ยงต่อการเกิดปฏิกริยาระหว่างด่างกับซิลิกา ด่างกับซิลิเกต หรือด่างกับคาร์บอนेट หากมีความเสี่ยงต่อการเกิดปฏิกริยาระหว่างด่างกับมวลรวม ปริมาณด่างในปูนซีเมนต์ต้องไม่สูงเกินกว่าที่กำหนด หากสูงเกินกว่าที่กำหนดควรใช้วัสดุประสานชนิดอื่นร่วมด้วย เช่น เถ้าลอย เป็นต้น เพื่อลดความเป็นด่างในคอนกรีต

6) การสึกกร่อน

คอนกรีตไม่ควรสึกกร่อนมากถึงขั้นรุนแรงในช่วงอายุการใช้งานที่ออกแบบไว้ ควรมีวิธีการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีต ข้อกำหนดในเรื่องการสึกกร่อนของคอนกรีตขึ้นอยู่กับชนิดขององค์อาคารหรือโครงสร้าง และสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตต้องเผชิญ

7) การเผชิญกับซัลเฟต

คอนกรีตต้องมีความต้านทานซัลเฟต ค่าการขยายตัว (ร้อยละของความยาวของชิ้นทดสอบเริ่มต้น) และ/หรือค่าการสูญเสียน้ำหนัก ของชิ้นทดสอบที่ได้จากการทดสอบการขยายตัว และ/หรือการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากซัลเฟตตามวิธีการมาตรฐาน (Standard Sulfate Expansion or Weight Loss Test) ต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด ในระยะเวลาที่กำหนด

8) การเผชิญกับสารเคมีอื่นๆ

คอนกรีตต้องทนต่อการกัดกร่อนโดยสารเคมีอื่น เช่น กรด และ แอลกอฮอล์ ร้อยละ การสูญเสียน้ำหนักเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้นต้องไม่เกินกว่าที่กำหนด ใน ระยะเวลาที่กำหนด

9) การแข็งตัวและห่อหุ้มละลายของน้ำในคอนกรีต

คอนกรีตต้องสามารถทนต่อการแข็งตัวและห่อหุ้มละลายของน้ำใน คอนกรีตได้โดยที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงไม่เกินกว่าร้อยละที่กำหนดเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น

10) การเสื่อมสภาพโดยกระบวนการทางชีววิทยา

ร้อยละของการสูญเสียกำลังอัดเทียบกับกำลังอัดเมื่อเริ่มทดสอบ โดยทดสอบ ด้วยวิธีเร่ง (Specified Accelerated Degradation Test) ต้องไม่เกินกว่าที่กำหนด

3.2 คอนกรีตในสภาพแวดล้อมต่างๆ

ในอดีตที่ผ่านมาการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก มีการกำหนดข้อกำหนดของคอนกรีตเป็น ลักษณะเดียวกัน แม้ว่าสภาพแวดล้อมของโครงสร้างจะมีความแตกต่างกัน ทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ใน สภาพแวดล้อมที่รุนแรงมีอายุการใช้งานสั้นลง ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และซ่อมแซมสูง หาก สามารถกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตโดยให้มีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างจะต้องเผชิญ ก็จะทำให้คอนกรีตมีอายุการใช้งานยาวนาน ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และซ่อมแซมในอนาคต ดังนั้น ในโครงการก่อสร้างที่มีเงื่อนไขหรือก่อสร้างในพื้นที่ที่ต้องพิจารณาความคงทนของสิ่งก่อสร้างคอนกรีตให้มี อายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษา (Maintenance-Free Service Life) ไม่น้อยกว่า 25 ปี โดยในแบบและ รายละเอียดการก่อสร้างไม่ได้ระบุลักษณะความต้องการด้านความคงทนเอาไว้ ให้พิจารณาลักษณะของความ คงทนตามลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อม ดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องคำนึงถึงตามลักษณะงานก่อสร้างและ สภาพแวดล้อมของโครงสร้าง (ข้อ 3.2)

ลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อม	การออกแบบให้คำนึงถึงหัวข้อความคงทนต่อไปนี้เป็นหลัก
1. น้ำจืด ก) ใต้น้ำ ข) เผชิญวัฏจักรเปียกสลับแห้ง ค) บรรยากาศบริเวณที่สัมผัสสละองน้ำได้	ไม่มี การเป็นสนิมของเหล็กเสริม การต้านทานคาร์บอนชั่น และ/หรือ การเป็นสนิมของเหล็กเสริม

**ตารางที่ 1 (ต่อ) คุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องคำนึงถึงตามลักษณะงานก่อสร้างและ
สภาพแวดล้อมของโครงสร้าง**
(ข้อ 3.2)

ลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อม	การออกแบบให้คำนึงถึงหัวข้อความคงทนต่อไปนี้เป็นหลัก
2. น้ำกร่อย ก) ใต้น้ำ ข) เภชวิทยุจักรเปือกสลับแห้ง ค) บรรยากาศบริเวณที่สัมผัสละอองน้ำได้	การต้านทานซัลเฟตและการเป็นสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ การเป็นสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ การต้านทานคาร์บอนชั้น และ/หรือ การเป็นสนิมของเหล็กเสริม เนื่องจากคลอไรด์
3. น้ำทะเล ก) ใต้น้ำ ข) เภชวิทยุจักรเปือกสลับแห้ง ค) บรรยากาศบริเวณที่สัมผัสละอองน้ำได้	การต้านทานซัลเฟตและการเป็นสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ การเป็นสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ การเป็นสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ หรือ การเป็นสนิมของ เหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์และคาร์บอนชั้น
4. น้ำเสีย	การต้านทานกรดซัลฟูริก และ การต้านทานซัลเฟต หรือสารเคมีอื่นๆ
5. ใต้ดิน และ ใต้พื้นที่องทะเล ก) มีซัลเฟต ข) ไม่มีซัลเฟต	การต้านทานซัลเฟต ไม่มี
6. ดินผิวดิน (เช่น ตอม่อ คานคอดิน โครงสร้างบริเวณดินผิวดิน) ก) สัมผัสคลอไรด์ ข) ไม่สัมผัสคลอไรด์	การเป็นสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ การเป็นสนิมของเหล็กเสริม
7. บรรยากาศ (สัมผัสกับก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์)	การเป็นสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนชั้น
8. ในบรรยากาศที่ต้องคำนึงถึงการหดตัว แบบแห้ง (มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 100%)	การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง
9. คอนกรีตหนา เช่น เขื่อน ฐานรากขนาดใหญ่ และ โครงสร้างที่มีความหนามาก	การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ
10. ชิ้นส่วนบางต่อเนื่องที่มีการยึดรั้ง	การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว
11. งานก่อสร้างที่สัมผัสสารเคมีอื่น	ความสามารถในการต้านทานสารเคมีที่เกี่ยวข้อง

ข้อเสนอแนะ

หากโครงสร้างคอนกรีตได้รับการเคลือบผิวในด้านที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อม เช่น เคลือบผิวด้วยอีพ็อกซี ฉาบปูน ทิศกระเบื้อง หรือทาสี โดยมีการบำรุงรักษาวัสดุเคลือบผิวเป็นอย่างดีในช่วงการใช้งาน โครงสร้าง จะทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่ได้รับการเคลือบผิวนั้นมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ยกเว้นการแตกร้าว เนื่องจากอุณหภูมิของคอนกรีตหลา (รายการที่ 9)

ส่วนที่ 4 ข้อกำหนดทั่วไปในการออกแบบเมื่อพิจารณาถึงความคงทน

4.1 ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด

ในการออกแบบคอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการเสื่อมสภาพและสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องมีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด ซึ่งระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุดสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$C_{min} = \alpha \cdot C_0 \quad (4.1-ก)$$

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม (α)

(ข้อ 4.1)

ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) หรือ กำลังอัดประลัย (f'_c) ทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน	ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม
$w/b > 0.65$ หรือ $f'_c < 20$ MPa	1.2
$0.45 \leq w/b \leq 0.65$ หรือ $20 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 40 \text{ MPa}$	1.0
$w/b < 0.45$ หรือ $f'_c > 40 \text{ MPa}$	0.9 [*]

หมายเหตุ

(*) ยกเว้นกรณีที่ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไปไม่เกิน 20 มม. และกรณีที่ต้องเผชิญกับกรดหรือเผชิญกับสภาวะซัลเฟตตั้งแต่ระดับปานกลางขึ้นไป ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 1.0

ตารางที่ 3 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_0) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป

(ข้อ 4.1)

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด
(ก) คอนกรีตหล่อในที่ 1) คอนกรีตที่หล่อติดกับดิน โดยใช้ดินเป็นแบบ และผิวคอนกรีตสัมผัสกับดินตลอดเวลาที่ใช้งาน 75 2) คอนกรีตที่สัมผัสดิน หรือถูกแดดฝน สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 16 มม. 50 สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. และเล็กกว่า 40 3) คอนกรีตที่ไม่สัมผัสดิน หรือไม่ถูกแดดฝน ในแผ่นพื้น ผนัง และตง - สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป 40 - สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่า 20 ในคาน - เหล็กเสริมหลัก เหล็กลูกตั้ง 40 ในเสา - เหล็กปลอกเดี่ยวหรือปลอกเกลียว 40	
(ข) คอนกรีตหล่อสำเร็จ (ควบคุมคุณภาพจากโรงงาน) 1) คอนกรีตที่สัมผัสดิน หรือถูกแดดฝน ในแผ่นผนัง - สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป 40 - สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่า 20 ในองค์อาคารอื่น - สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป 50 - สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มม. ถึง 36 มม. 40 - สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. และเล็กกว่า 30	

ตารางที่ 3 (ต่อ) ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_o) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป
(ข้อ 4.1)

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด
2) คอนกรีตที่ไม่สัมผัสดิน หรือไม่ถูกแดดฝน	
ในแผ่นพื้นผนัง และดง	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	30
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่า	15
ในคาน	
- เหล็กเสริมหลัก เหล็กดุกตั้งในเสา	25
- เหล็กดุกตั้ง เหล็กปลอกเดี่ยวนหรือปลอกเกลียว	30
(ค) คอนกรีตที่หล่อในน้ำ	100

ตารางที่ 4 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_o) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่มีความเสี่ยง
ต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม
(ข้อ 4.1)

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด
(ก) คอนกรีตหล่อในที่ ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง	
แผ่นพื้น และผนัง	50
องค์อาคารอื่น	65
(ข) คอนกรีตหล่อสำเร็จ (ควบคุมคุณภาพจากโรงงาน) ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง	
แผ่นพื้น และผนัง	40
องค์อาคารอื่น	50

ข้อแนะนำ

วิศวกรผู้ออกแบบไม่สามารถกำหนดระยะหุ้มเหล็กเสริมให้น้อยกว่า C_{min} แต่สามารถกำหนดระยะหุ้มเหล็กเสริมให้มากกว่าค่า C_{min} นี้ได้ ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานที่ต้องการ ซึ่งระยะหุ้มเหล็กเสริมที่เหมาะสมตามอายุการใช้งานสามารถคำนวณได้จากหัวข้อที่ 5.1 สำหรับสภาพแวดล้อมคลอไรด์ และ 5.2 สำหรับสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั่น

4.2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

โดยปกติจะกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตตามต้องการ แต่สำหรับลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อมดังที่กำหนดในหัวข้อ 3.2 เพื่อให้คอนกรีตมีความทนต่อการเสื่อมสภาพและสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ จำเป็นต้องกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้ต่ำ ถึงแม้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จะสูงกว่ากำลังอัดที่ต้องการในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบก็ตาม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุดให้เป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด

- | | |
|--|------|
| 1) คอนกรีตที่ต้องการความทึบน้ำ..... | 0.50 |
| 2) คอนกรีตในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีต
ระดับปานกลาง..... | 0.50 |
| 3) คอนกรีตในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีต
ระดับรุนแรง..... | 0.45 |

ข้อเสนอแนะ

วิศวกรผู้ออกแบบสามารถกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้ต่ำกว่าค่าที่กำหนดในหัวข้อนี้ได้ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานที่ต้องการ โดยสามารถคำนวณได้จากหัวข้อที่ 5.1 สำหรับสภาพแวดล้อมคลอไรด์ และ 5.2 สำหรับสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น

4.3 ความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด

ในบางโอกาส องค์อาคารบางประเภท เช่น คาน อาจไม่สามารถหลีกเลี่ยงรอยร้าวได้เช่น รอยร้าวที่เกิดจากโมเมนต์คดได้ ซึ่งรอยร้าวเหล่านี้มักไม่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงขององค์อาคารถ้าองค์อาคารนั้นไม่ได้มีการเสื่อมสภาพ อย่างไรก็ตาม รอยร้าวที่มีความกว้างมากก็จะเป็นผลให้สารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตและเหล็กเสริมซึมผ่านเข้าไปได้ง่าย ทำให้องค์อาคารนั้นเสื่อมสภาพเร็วขึ้น และมีอายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมขนาดความกว้างของรอยร้าวไม่ให้มากเกินไป ความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด สำหรับโครงสร้างในสภาพแวดล้อมทั่วไป หรือในสภาพแวดล้อมที่เผชิญต่อการเป็นสนิมของเหล็กเสริม สามารถกำหนดได้จากตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด

(ข้อ 4.3)

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	เหล็กเสริมทั่วไป	เหล็กเสริมอัดแรง
สภาวะทั่วไป	$0.005 \times C$	$0.004 \times C$
สภาวะเสี่ยงต่อการเกิดสนิม	$0.004 \times C$	ห้ามมีรอยร้าว
สภาวะเสี่ยงต่อการเกิดสนิมรุนแรง	$0.0035 \times C$	ห้ามมีรอยร้าว

หากระยะหุ้มเหล็กเสริม (C) เกิน 100 มม. ให้ใช้ค่า 100 มม. ในการคำนวณหาความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด
ข้อแนะนำ

วิศวกรผู้ออกแบบสามารถเลือกกำหนดขนาดความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุดให้ต่ำกว่าค่าในตารางก็ได้ ถ้าต้องการให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

4.4 ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่ยอมให้

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวการที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลง และเมื่อถึงจุดวิกฤตแล้ว ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตาม ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่มาจากส่วนผสมแต่ละชนิด (ไม่รวมที่ซึมผ่านเข้ามาจากสิ่งแวดล้อม) โดยจะต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนดในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่ยอมให้

(ข้อ 4.4)

หน่วยเป็นร้อยละของน้ำหนักวัสดุประสาน

ลักษณะงานก่อสร้าง	ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้สูงสุดในคอนกรีต
(ก) คอนกรีตอัดแรง	0.06
(ข) คอนกรีตเสริมเหล็กที่ขณะใช้งานมีการสัมผัสกับคลอไรด์ เช่น กำแพงกันคลื่น (Sea-Retaining Walls)	0.15
(ค) คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสภาพแห้ง หรือขณะใช้งานมีการป้องกันความชื้น	1.00
(ง) การก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่น	0.30

โดยการทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 1218/C 1218M : Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete

ส่วนที่ 5 การออกแบบเมื่อพิจารณาการเกิดสนิม

5.1 การเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์

เมื่อคอนกรีตเผชิญต่อคลอไรด์ในสภาพแวดล้อม คลอไรด์จะซึมเข้าสู่คอนกรีต หากปริมาณคลอไรด์ ณ ตำแหน่งเหล็กเสริมมากเกินไปกว่าค่าวิกฤติจะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเป็นสนิมได้ ตัวอย่างของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ เช่น โครงสร้างได้ทะเล โครงสร้างริมทะเลบริเวณน้ำขึ้น-น้ำลงหรือบริเวณที่สัมผัสคลื่นและละอองทะเล โครงสร้างใกล้ทะเลหรือต้องเผชิญกับลมทะเล และโครงสร้างบนผิวดินที่มีเกลือคลอไรด์ เป็นต้น เพื่อให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ คอนกรีตจะต้องถูกออกแบบให้ปริมาณคลอไรด์ ณ ระยะเหล็กเสริมมีค่าไม่เกินค่าวิกฤติที่จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมได้ ในช่วงระยะเวลาอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษา ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\gamma_i \cdot (Cl_d + Cl_{do}) < Cl_{lim} \quad (5.1-ก)$$

โดยที่ Cl_{lim} มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

γ_i มีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับโครงสร้างที่ต้องการอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาน้อยกว่า 15 ปี และมีค่าเท่ากับ 1.1 สำหรับโครงสร้างที่ต้องการอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาตั้งแต่ 15 ปีขึ้นไป

ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริมในส่วนที่แพร่มาจากสภาพแวดล้อม (Cl_d) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Cl_d = \frac{Cl_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{C}{2\sqrt{D_a \times t_r}} \right) \right]}{B} \times 100 \tag{5.1-ข}$$

ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (Cl_s) สามารถกำหนดได้จากตารางที่ 7 ตามสภาพแวดล้อมคลอไรด์

ตารางที่ 7 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต
(ข้อ 5.1)

หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

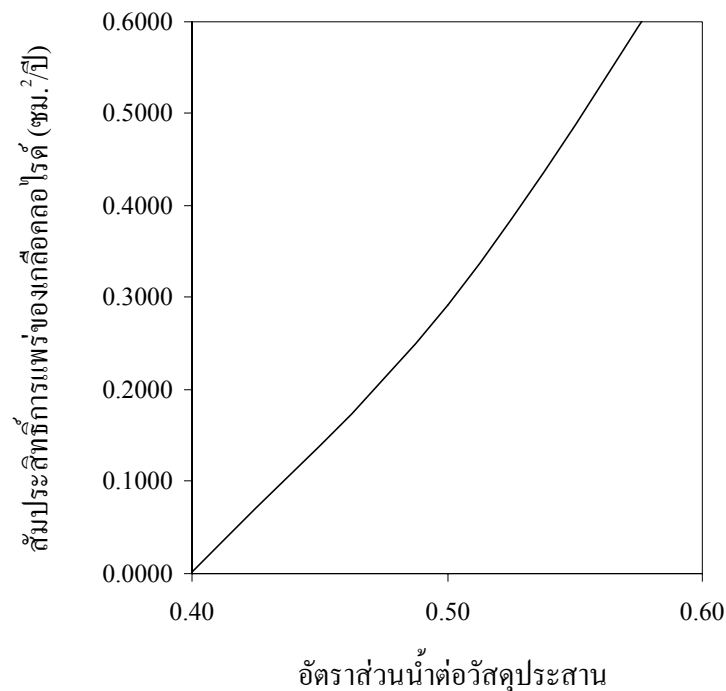
บริเวณน้ำขึ้น-ลง	ติดชายฝั่ง	ระยะจากฝั่ง (ม.)			
		100	250	500	1000
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (Apparent Chloride Diffusion Coefficient, D_a) ซึ่งพิจารณาถึงผลของการแตกร้าวของคอนกรีตด้วย สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$D_a = \gamma_c \cdot D_k + (w/l) \cdot (w/w_a)^2 \cdot D_0 \tag{5.1-ค}$$

โดยที่ D_0 มีค่าเท่ากับ 200 ซม.²/ปี
 γ_c มีค่าเท่ากับ 1.3 สำหรับคอนกรีตทั่วไป และมีค่าเท่ากับ 1.1 สำหรับคอนกรีตบริเวณผิวบนของโครงสร้าง

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ (Apparent Chloride Diffusion Coefficient) ในคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว (D_k) สามารถหาได้จากรูปที่ 1



**รูปที่ 1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ (Apparent Chloride Diffusion Coefficient) ในคอนกรีตไม่
แตกร้าวที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน**
(ข้อ 5.1)

ข้อแนะนำ

- (1) ในกรณีที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในส่วนผสมคอนกรีตตั้งแต่แรก เช่น จากการใช้ทรายทะเล ใช้น้ำกร่อย หรือใช้สารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ด้วยในการผลิตคอนกรีต ปริมาณคลอไรด์เฉพาะที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่ย่อมให้มีได้ในคอนกรีตที่อายุ 28-42 วันก่อนที่คลอไรด์จากภายนอกจะเข้าสู่คอนกรีต ต้องมีไม่มากเกินไปกว่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 6
- (2) ในกรณีที่คอนกรีตต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมอื่นๆ ที่มีเกลือคลอไรด์ เช่น คอนกรีตในโรงงานน้ำแข็ง หรือ คอนกรีตใต้ดินบริเวณที่มีเกลือสินเธาว์ ให้ปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ

5.2 การเกิดสนิมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน

เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่เข้าไปในคอนกรีต และทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันซึ่งจะทำให้ความสามารถของคอนกรีตในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมลดลงจนทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ตัวอย่างของสภาพแวดล้อมที่มีคาร์บอนเนชัน เช่น โครงสร้างในที่จอดรถ โครงสร้างริมถนนหรือใต้สะพานบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น โครงสร้างใต้สะพานที่เผชิญกับเขม่าควันต่างๆ ตลอดจนในอาคารที่มีผู้คนอยู่มาก เป็นต้น เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและมีอายุการใช้งานที่ปลอดภัย

บำรุงรักษาตามที่กำหนด ต้องควบคุมให้ความลึกคาร์บอนชั้นในช่วงอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษา ให้มีค่าน้อยกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยสามารถใช้สมการต่อไปนี้ในการออกแบบ

$$C \geq \gamma_i \cdot X_c \quad (5.2-ก)$$

โดยที่ γ_i มีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับโครงสร้างที่ต้องการอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาน้อยกว่า 15 ปี และมีค่าเท่ากับ 1.1 สำหรับโครงสร้างที่ต้องการอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษา ตั้งแต่ 15 ปีขึ้นไป

ความลึกคาร์บอนชั้นวัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ (X_c) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t_r} \quad (5.2-ข)$$

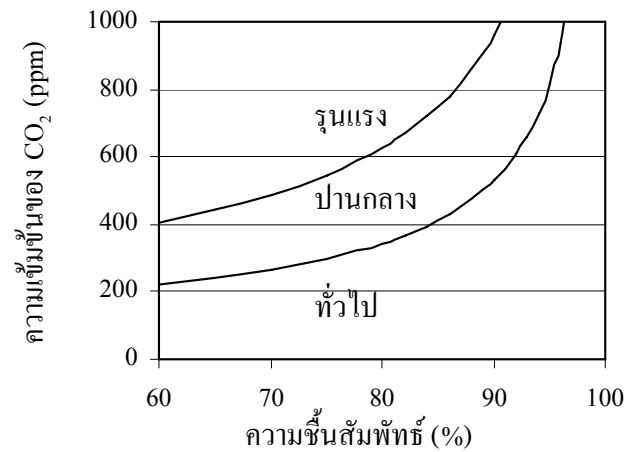
โดยที่ α_1 มีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสความเปียกชื้น และมีค่าเท่ากับ 0.95 สำหรับผิวคอนกรีตที่สัมผัสความเปียกชื้น

สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น (α_2) สามารถกำหนดได้จากตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น
(ข้อ 5.2)

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	α_2
สภาวะทั่วไป	0.65
เสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นปานกลาง	0.85
เสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง	1.00

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 2 โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ก่อสร้าง

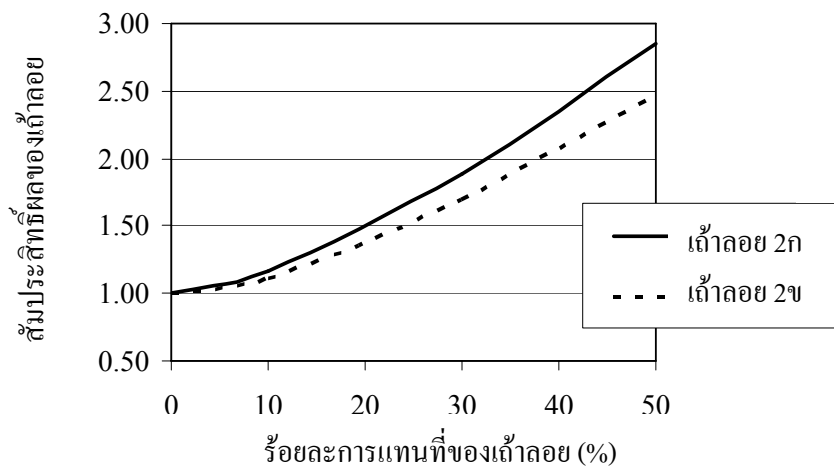


รูปที่ 2 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น
(ข้อ 5.2)

สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชั่น (k) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$k = 17.5 \cdot k_r \cdot (w/b)^3 \quad (5.2-ค)$$

ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน (k_r) สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 3 (ชนิดของเถ้าลอย 2ก และ 2ข กำหนดตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ ว.ส.ท. 1014-46)



รูปที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน
(ข้อ 5.2)

ข้อเสนอแนะ

สมการการออกแบบความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นชุดนี้ สามารถใช้ในการนิยามของคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวและคอนกรีตควรมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.65 และมีการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานไม่เกินร้อยละ 50 ในกรณีของคอนกรีตที่มีรอยร้าว ผลของการมีรอยร้าวจะทำให้อายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาลดลง ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น (k) ในสมการที่ (5.2-ค) ไม่ได้คำนึงถึงผลของรอยแตกร้าว หากต้องการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่มีรอยร้าวหรือใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเกิน 0.65 หรือมีการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานเกินกว่าร้อยละ 50 ควรปรึกษาผู้เชี่ยวชาญพิเศษ

ส่วนที่ 6 การออกแบบเมื่อพิจารณาการหดตัว

6.1 การหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวของคอนกรีตควรคำนวณโดยคำนึงถึงความชื้นบริเวณรอบๆ โครงสร้าง รูปร่าง ขนาดขององค์อาคาร (อัตราส่วนปริมาตรต่อผิวสัมผัสอากาศ) และสัดส่วนผสมคอนกรีต เป็นต้น ค่าการหดตัวแบบแห้งสุดท้ายของคอนกรีต (Ultimate Drying Shrinkage Strain) อาจกำหนดให้มีค่าตามตารางที่ 9 ในกรณีคอนกรีตปกติที่ไม่เสริมเหล็ก และตามตารางที่ 10 ในกรณีที่มีการเสริมเหล็ก โดยมีอัตราส่วนเหล็กเสริมหลักประมาณร้อยละ 1 ค่าการหดตัวแบบแห้งสุดท้ายเป็นค่าที่ใช้สำหรับการคำนวณการหดตัวแบบแห้ง ณ เวลาใดๆ

ตารางที่ 9 ค่าการหดตัวสุดท้ายของคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก (Ultimate Shrinkage Strain)

(ข้อ 6.1)

หน่วยเป็นไมครอน หรือ $\times 10^{-6}$

สภาพแวดล้อม	อายุคอนกรีต*				
	น้อยกว่า 3 วัน	4 ถึง 7 วัน	28 วัน	3 เดือน	1 ปี
นอกอาคาร	400	350	230	200	120
ในอาคาร	730	620	380	260	130

*อายุคอนกรีตเมื่อเริ่มสัมผัสกับอากาศหลังการบ่ม โดยปกติเท่ากับอายุคอนกรีตเมื่อเสร็จสิ้นการบ่ม

หมายเหตุ

ค่าในตารางที่ 9 ใช้ได้ดีสำหรับคอนกรีตธรรมดาที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ที่มีกำลังอัดไม่เกิน 55 MPa (หรือไม่เกิน 70 MPa หากใช้การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในการเพิ่มกำลังอัด) มีปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรระหว่าง 160-180 กก./ลบ.ม. มีปริมาณปูนซีเมนต์ระหว่าง 350-400 กก./ลบ.ม. และองค์อาคารที่มีอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศประมาณ 150 มม. อุณหภูมิมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบค่าในตารางที่ 9 คือ

ประมาณ 20 °C และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 65 ในกรณีนอกอาคาร ประมาณร้อยละ 40 ในกรณี
ในอาคารที่มีการปรับอากาศ และประมาณร้อยละ 50 ในกรณีในอาคารที่ไม่มีการปรับอากาศ

ตารางที่ 10 ค่าการหดตัวสุดท้ายของคอนกรีตเสริมเหล็ก (Ultimate Shrinkage Strain)
(อัตราส่วนเหล็กเสริมร้อยละ 1)
(ข้อ 6.1)

หน่วยเป็นไมครอน หรือ $\times 10^{-6}$

สภาพแวดล้อม	อายุคอนกรีต*				
	น้อยกว่า 3 วัน	4 ถึง 7 วัน	28 วัน	3 เดือน	1 ปี
นอกอาคาร	340	290	180	160	120
ในอาคาร	620	520	310	210	120

*อายุคอนกรีตเมื่อเริ่มสัมผัสกับอากาศหลังการบ่ม โดยปกติเท่ากับอายุคอนกรีตเมื่อเสร็จสิ้นการบ่ม

คุณสมบัติของมวลรวมและปูนซีเมนต์ การจี้เขย่า การบ่มคอนกรีต รวมถึงอุณหภูมิและความชื้นบริเวณ
โครงสร้าง รูปร่าง ขนาดของพื้นที่หน้าตัดองค์อาคาร และสัดส่วนผสมคอนกรีตมีผลต่อการหดตัวของ
คอนกรีต ซึ่งหมายรวมถึง การหดตัวแบบแห้ง การหดตัวแบบบอโตจีเนียส และการหดตัวแบบคาร์บอนชั่น
ความชื้นของสภาพแวดล้อมและขนาดขององค์อาคารมีผลอย่างมากต่อค่าการหดตัวแบบแห้ง และอัตราการ
การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต ซึ่งโดยปกติสามารถคำนวณได้จากสมการ (6.1-ก) สำหรับคอนกรีตปกติที่
ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน มีกำลังรับแรงอัดไม่เกิน 55 MPa (หรือไม่เกิน 70 MPa หากใช้การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ
ประสานในการเพิ่มกำลังอัด)

$$\varepsilon'_{cs}(t,t_0) = \left[1 - \exp \left\{ -0.108(t-t_0)^{0.56} \right\} \right] \cdot \varepsilon'_{sh} \tag{6.1-ก}$$

$$\varepsilon'_{sh} = -500 + 780 \left[1 - \exp \left(\frac{RH}{100} \right) \right] + 380 \log_e W - 50 \left[\log_e \left(\frac{V/S}{10} \right) \right]^2 \tag{6.1-ข}$$

โดยที่ $45\% \leq RH \leq 80\%$
 $130 \text{ กก./ลบ.ม.} \leq W \leq 230 \text{ กก./ลบ.ม.}$
 $100 \text{ มม.} \leq V/S \leq 300 \text{ มม.}$

หมายเหตุ

สมการ (6.1-ก) ถูกสร้างขึ้นบนพื้นฐานของผลการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C หากอุณหภูมิสูงกว่านี้ ค่าการหดตัวมักจะมีค่าสูงขึ้น ค่าการหดตัวแบบแห้งที่อุณหภูมิต่างจาก 20°C สามารถคำนวณได้โดยการปรับแก้ t_0 และ t ที่ใช้ในสมการ (6.1-ก) เนื่องจากผลของอุณหภูมิ

การปรับแก้อายุของคอนกรีตเนื่องจากผลของอุณหภูมิ ใช้สมการ (6.1-ค)

$$t_{0c} \text{ และ } t_c = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T_i / T_0} \right] \quad (6.1-ค)$$

โดยที่ T_0 มีค่าเท่ากับ 1°C

ข้อจำกัด

ทดสอบที่อุณหภูมิ 20°C (สามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิ 0-40°C)

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานระหว่าง 0.40-0.65

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน

กรณีคอนกรีตกำลังสูง (ในที่นี้คือคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่า 55 MPa ขึ้นไป) ควรคำนึงถึงผลของการหดตัวแบบอโตจีเนียสเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ด้วย สมการ (6.1-ง) สามารถใช้ในการคำนวณค่าการหดตัวของคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงถึง 80 MPa

ในกรณีนี้ให้เลือกใช้สมการ (6.1-ก) หรือ สมการ(6.1-ง) โดยให้เลือกใช้ค่าที่สูงกว่า

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = \varepsilon'_{ds}(t, t_0) + \varepsilon'_{as}(t, t_0) \quad (6.1-ง)$$

$$\varepsilon'_{ds}(t, t_0) = \frac{\varepsilon'_{ds\infty} \cdot (t - t_0)}{\beta + (t - t_0)} \quad (6.1-จ)$$

$$\beta = \frac{4W\sqrt{V/S}}{100 + 0.7t_0} \quad (6.1-ฉ)$$

$$\varepsilon'_{ds\infty} = \frac{\varepsilon'_{ds\rho}}{1 + \eta \cdot t_0} \quad (6.1-ช)$$

$$\varepsilon'_{ds\rho} = \frac{\alpha_c (1 - RH / 100) W}{1 + 150 \exp \left\{ -\frac{500}{f'_c(28)} \right\}} \quad (6.1-ซ)$$

$$\eta = 10^{-4} \{15 \exp(0.007 f'_c(28)) + 0.25W\} \quad (6.1-ณ)$$

โดยที่ $130 \text{ กก./ลบ.ม.} \leq W \leq 230 \text{ กก./ลบ.ม.}$

$100 \text{ มม.} \leq V/S \leq 300 \text{ มม.}$

$40\% \leq RH \leq 90\%$

$f'_c(28) \leq 80 \text{ MPa}$

α_c มีค่าเท่ากับ 11 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ความร้อนต่ำ
และมีค่าเท่ากับ 15 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

$1 \text{ วัน} \leq t_0 \leq 98 \text{ วัน}, t_0 = 98 \text{ วัน}$ กรณี $t_0 > 98$

กรณีคอนกรีตมวลเบา ค่าการหดตัวจะสูงกว่าคอนกรีตปกติเนื่องจากมีค่า Stiffness น้อยกว่า ค่าการหดตัวสุดท้ายของคอนกรีตมวลเบา อาจใช้ค่าในตารางที่ 9 ในกรณีที่ไม้เสริมเหล็ก และตามตารางที่ 10 ในกรณีที่มีการเสริมเหล็ก โดยมีอัตราส่วนเหล็กเสริมหลักประมาณร้อยละ 1 ได้เช่นเดียวกับคอนกรีตปกติ

6.2 การหดตัวแบบออโตจีเนียส

การหดตัวแบบออโตจีเนียสจะเกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหากคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ โดยทั่วไป ค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสสุดท้ายสำหรับอายุ t_0 ที่ต่างๆ กัน อาจใช้ค่าในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสสุดท้ายสำหรับอายุ t_0 ที่ต่างๆ กัน

(ข้อ 6.2)

หน่วยเป็นไมครอน หรือ $\times 10^{-6}$

กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (เมกะปาสกาล)	t_0 (วัน)		
	1	3	7
100	230	110	50
80	160	80	40
60	150	90	50

หมายเหตุ

เงื่อนไขสำหรับค่าในตารางที่ 11 คือ

- (1) กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน คือ กำลังอัดที่ทดสอบโดยการบ่มก้อนตัวอย่างในน้ำ
- (2) ความแม่นยำในการทำนายค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียส $\pm 40\%$
- (3) ทดสอบเฉพาะกับสัดส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนเท่านั้น

ในการคำนวณ $\varepsilon'_{as}(t, t_0)$ เป็นฟังก์ชันของเวลา ให้ใช้สมการ (6.2-ก) และสมการ (6.2-ข) เพื่อคำนวณค่าการหดตัวแบบอโตจีเนียส

$$\varepsilon'_{as}(t, t_0) = \varepsilon'_{as}(t) - \varepsilon'_{as}(t_0) \quad (6.2-ก)$$

$$\varepsilon'_{as}(t) = \gamma_b \varepsilon'_{as\infty} \left[1 - \exp \left\{ -a(t - t_s)^b \right\} \right] \quad (6.2-ข)$$

γ_b มีค่าเท่ากับ 1 กรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ส่วน

ค่าการหดตัวแบบอโตจีเนียสสุดท้าย ($\varepsilon'_{as\infty}$) สามารถคำนวณได้จากสมการ (6.2-ค)

$$\varepsilon'_{as\infty} = 3070 \exp \{ -7.2(W / C) \} \quad (6.2-ค)$$

ตัวคูณ a และ b ใช้ค่าตามตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าตัวคูณ a และ b สำหรับใช้ในสมการ (6.2-ข)

(ข้อ 6.2)

W / C	a	b
0.20	1.2	0.4
0.23	1.5	0.4
0.30	0.6	0.5
0.40	0.1	0.7
> 0.50	0.03	0.8

การปรับแก้อายุของคอนกรีตเนื่องจากผลของอุณหภูมิ ใช้สมการ (6.1-ค)

ส่วนที่ 7 การออกแบบเมื่อพิจารณาการกัดกร่อน

เมื่อคอนกรีตเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟต ซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับบางองค์ประกอบในคอนกรีต ซึ่งจะทำให้คอนกรีตขยายตัวแตกร้าวหรือเสื่อมสภาพ ตัวอย่างของโครงสร้างที่สัมผัสกับซัลเฟต เช่น โครงสร้างใต้ดิน โครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำทะเล หรือโครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำเสีย โดยทั่วไปในสภาพแวดล้อมเหล่านี้จะพบสารละลายซัลเฟตได้ 2 ชนิดคือ โซเดียมซัลเฟต และ/หรือ แมกนีเซียมซัลเฟต

7.1 การคัดกรองเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมที่มีโซเดียมซัลเฟตสามารถแบ่งได้โดยใช้ตารางที่ 13 และเพื่อให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อโซเดียมซัลเฟต คอนกรีตจะต้องถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติดังตารางที่ 14

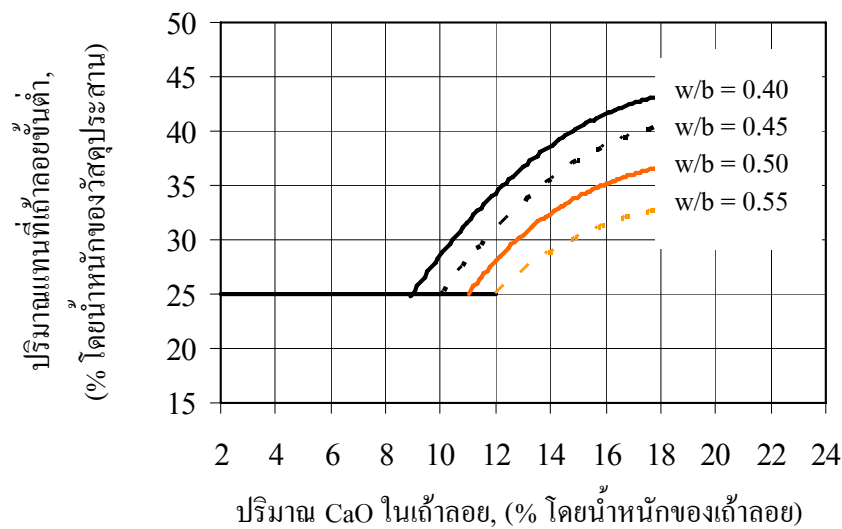
ตารางที่ 13 ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมที่มีโซเดียมซัลเฟต
(ข้อ 7.1)

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	ความเข้มข้นซัลเฟต (SO_4^{2-})	
	ในน้ำ (ppm)	ปริมาณซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ในดิน (% โดยน้ำหนักของดิน)
สถานะทั่วไป	น้อยกว่า 150	น้อยกว่า 0.1
เสี่ยงต่อซัลเฟตปานกลาง	150 – 1500	0.1 – 0.2
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรง	1500 – 10000	0.2 – 2.0
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรงมาก	มากกว่า 10000	มากกว่า 2.0

ตารางที่ 14 ข้อกำหนดของคอนกรีตเพื่อให้มีความคงทนต่อโซเดียมซัลเฟต
(ข้อ 7.1)

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	ชนิดวัสดุประสานที่ควรใช้	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานสูงสุด
สถานะทั่วไป	ไม่จำกัด	-
เสี่ยงต่อซัลเฟตปานกลาง	2 หรือ 5 หรือ 1 กับสารปอซโซลาน	0.50
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรง	5 หรือ 1 กับสารปอซโซลาน	0.45
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรงมาก	1 กับสารปอซโซลาน หรือ 5 กับสารปอซโซลาน	0.40

การออกแบบคอนกรีตให้คงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสารละลายซัลเฟตในกรณีที่ใช้เถ้าลอยเพื่อแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอยขั้นต่ำที่ใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพไม่ด้อยไปกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ปูนซีเมนต์ทนซัลเฟต) ในการต้านทานโซเดียมซัลเฟต สามารถกำหนดได้จากรูปที่ 4



รูปที่ 4 ปริมาณเถ้าลอยที่พอเหมาะในการแทนที่ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1
(ข้อ 7.1)

7.2 การกักต่อนเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมที่มีแมกนีเซียมซัลเฟตสามารถแบ่งได้โดยใช้ตารางที่ 15 และเพื่อให้คอนกรีตสามารถต้านทานต่อแมกนีเซียมซัลเฟตได้ คอนกรีตจะต้องถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติดังตารางที่ 16

ตารางที่ 15 ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต
(ข้อ 7.2)

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	ความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตในน้ำ (ppm)
สถานะทั่วไป	น้อยกว่า 300
เสี่ยงต่อซัลเฟตปานกลาง	300 – 1000
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรง	1000 – 3000
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรงมาก	3000 – ค่าอิมิตัว

ตารางที่ 16 ข้อกำหนดของคอนกรีตเพื่อให้มีความทนต่อแมกนีเซียมซัลเฟต

(ข้อ 7.2)

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	ชนิดปูนซีเมนต์ที่ควรใช้	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด
สภาวะทั่วไป	ไม่จำกัด	-
เสี่ยงต่อซัลเฟตปานกลาง	1 หรือ 2 หรือ 5	0.50
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรง	5	0.45
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรงมาก	5	0.40

ข้อแนะนำ

- (1) ไม่ควรใช้สารปอซโซลานแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่ต้องเผชิญกับแมกนีเซียมซัลเฟตเนื่องจากจะทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพในแมกนีเซียมซัลเฟตเร็วกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ล้วน
- (2) เมื่อจำเป็นต้องออกแบบคอนกรีตให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยกว่า 0.35 ผู้ออกแบบคอนกรีตจำเป็นต้องคำนึงถึงการหดตัวแบบอโตจีเนียสด้วย

ส่วนที่ 8 การออกแบบเมื่อพิจารณาเรื่องอัคคีภัย

สำหรับอาคารที่ต้องการก่อสร้างให้สามารถทนไฟได้ตามกฎกระทรวงฉบับที่ 48 (พ.ศ. 2540) แห่งพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุดที่คำนวณได้จากสมการใดๆ ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนดในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_o) สำหรับคอนกรีตที่ต้องการก่อสร้างให้สามารถทนไฟได้

(ข้อ 8)

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด
(ก) คอนกรีตเสริมเหล็ก	
1) เสาสี่เหลี่ยมที่มีด้านแคบขนาด 300 มิลลิเมตรขึ้นไป	40
2) เสากลมหรือเสาดังแต่ห้าเหลี่ยมขึ้นไปที่มีรูปทรงใกล้เคียงเสากลม ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 300 มิลลิเมตรขึ้นไป	40
3) คานหรือโครงข้อหมุนคอนกรีตขนาดกว้างตั้งแต่ 300 มิลลิเมตรขึ้นไป	40
4) พื้นหนาไม่น้อยกว่า 115 มิลลิเมตร	20

ตารางที่ 17 (ต่อ) ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_o) สำหรับคอนกรีตที่ต้องการก่อสร้างให้สามารถทนไฟได้
(ข้อ 8)

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด
(ข) คอนกรีตอัดแรง	
1) คานชนิดค้ำจายค้ำก่อน	75
2) คานชนิดค้ำจายค้ำหลัง	
- กว้าง 200 มิลลิเมตร โดยปลายไม่เหนี่ยวรั้ง (unrestrained)	115
- กว้างตั้งแต่ 300 มิลลิเมตรขึ้นไป โดยปลายไม่เหนี่ยวรั้ง (unrestrained)	65
- กว้าง 200 มิลลิเมตร โดยปลายเหนี่ยวรั้ง (restrained)	50
- กว้างตั้งแต่ 300 มิลลิเมตรขึ้นไป โดยปลายเหนี่ยวรั้ง (restrained)	45
3) พื้นชนิดค้ำจายค้ำก่อนที่มีความหนาตั้งแต่ 115 มิลลิเมตรขึ้นไป	40
4) พื้นชนิดค้ำจายค้ำหลังที่มีความหนาตั้งแต่ 115 มิลลิเมตรขึ้นไป	
- ขอบไม่เหนี่ยวรั้ง (unrestrained)	40
- ขอบเหนี่ยวรั้ง (restrained)	20

เอกสารอ้างอิง

1. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต (ปรับปรุงครั้งที่ 2) พ.ศ. 2550
2. กฎกระทรวงฉบับที่ 48 (พ.ศ. 2540) แห่งพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522

ภาคผนวก ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างที่ 1

การออกแบบคอนกรีตให้มีความคงทนต่อการเกิดคาร์บอนขึ้น โดยกำหนดอายุการใช้งานที่ปลอดภัยบำรุงรักษา 50 ปี สำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารจอดรถ ซึ่งหล่อในที่และเสริมด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. อยู่ในสภาพแวดล้อมซึ่งมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 600 ppm และมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 70% และไม่ถูกฝน

วิธีคำนวณ

จากตารางที่ 3 ระยะหุ้มเหล็กเสริม (C_o) = 20 มม. [คอนกรีตหล่อในที่ (ไม่อัดแรง) ที่ไม่สัมผัสดินหรือไม่ถูกแดดฝนในแผ่นพื้นซึ่งมีการเสริมด้วยเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 16 มม.]

$$\text{ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด} \quad C_{min} = \alpha \cdot C_0$$

จากตารางที่ 2 สมมติให้ $\alpha = 1.0$ สำหรับคอนกรีตทั่วไปที่มี w/b ระหว่าง 0.45-0.65 หรือกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ระหว่าง 20-40 MPa

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด} \quad C_{min} = \alpha \cdot C_0 = 1.0 \times 20 = 20 \text{ มม.}$$

$$\text{จากสมการ (5.2-ก)} \quad C_{min} \geq \gamma_i \cdot X_c$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (γ_i) = 1.1 สำหรับโครงสร้างที่ต้องการอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษา 15 ปีขึ้นไป

ดังนั้น ความลึกคาร์บอนชั้นวัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ

$$X_c \leq \frac{C_{min}}{\gamma_i}$$

$$X_c \leq \frac{20}{1.1}$$

$$X_c \leq 18.18 \quad \text{-----}(1)$$

$$\text{จากสมการ (5.2-ข)} \quad X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t_r}$$

สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น (α_1) = 1.0 [สำหรับผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสความเปียกชื้น]

สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น (α_2) = 1.0 (จากรูปที่ 2 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 600 ppm และมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 70% จะอยู่ในระดับสิ่งแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเกิดคาร์บอนชั้นรุนแรง ดังนั้น จากตารางที่ 8 $\alpha_2 = 1.0$)

$$\text{สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น (k) คำนวณได้จากสมการ (5.2-ค)} \quad k = 17.5 \cdot k_r \cdot (w/b)^3$$

กรณีที่ 1 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 โดยไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอย

$$\text{จากรูปที่ 3} \quad k_r = 1.0$$

$$\text{ดังนั้น} \quad k = 17.5 \times 1.0 \times (w/b)^3 = 17.5(w/b)^3$$

$$X_c = 1.0 \times 1.0 \times 17.5(w/b)^3 \times \sqrt{50} = 123.74(w/b)^3 \quad \text{-----}(2)$$

$$(1) = (2) \quad 18.18 = 123.74(w/b)^3$$

$$\therefore \quad w/b = (18.18/123.74)^{1/3} = 0.53$$

(w/b ที่คำนวณได้ อยู่ในช่วงที่สมมุติค่าจากตารางที่ 2 จึงไม่ต้องคำนวณใหม่)

กรณีที่ 2 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ประเภท 2ก ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

$$\text{จากรูปที่ 3} \quad k_r = 1.5$$

$$\text{ดังนั้น} \quad k = 17.5 \times 1.5 \times (w/b)^3 = 26.25(w/b)^3$$

$$X_c = 1.0 \times 1.0 \times 26.25(w/b)^3 \times \sqrt{50} = 185.62(w/b)^3 \quad \text{-----}(3)$$

$$(1) = (3) \quad 18.18 = 185.62(w/b)^3$$

$$\therefore \quad w/b = (18.18/185.62)^{1/3} = 0.46$$

(w/b ที่คำนวณได้ อยู่ในช่วงที่สมมุติค่าจากตารางที่ 2 จึงไม่ต้องคำนวณใหม่)

สรุป การออกแบบคอนกรีตให้มีความคงทนต่อการเกิดคาร์บอนเนชันในสภาพแวดล้อมดังกล่าว หากใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 โดยไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอย จะต้องใช้อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ไม่เกิน 0.53 และกรณีที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ประเภท 2ก ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.46 โดยมีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่ต่ำกว่า 20 มม.

ตัวอย่างที่ 2

การออกแบบคอนกรีตให้มีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ โดยกำหนดอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษา 20 ปี หล่อ Girder ซึ่งใช้สำหรับท่าเทียบเรือ (Jetty)

วิธีคำนวณ

จากตารางที่ 4 ซึ่งใช้สำหรับโครงสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ระยะหุ้มเหล็กเสริม (C_0) = 65 มม. [คอนกรีตหล่อในที่ (องค์อาคารอื่นที่ไม่ใช่แผ่นพื้นและผนัง)]

$$\text{ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด} \quad C_{min} = \alpha \cdot C_0$$

จากตารางที่ 2 สมมุติให้ $\alpha = 1.0$ สำหรับคอนกรีตทั่วไปที่มี w/b ระหว่าง 0.45-0.65 หรือกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ระหว่าง 20-40 MPa

ดังนั้น ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด $C_{min} = \alpha \cdot C_0 = 1.0 \times 65 = 65$ มม.

จากสมการ (5.1-ก) $\gamma_i \cdot (Cl_d + Cl_{do}) < Cl_{lim}$

ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมได้ (Cl_{lim}) = 0.4 % ของน้ำหนักวัสดุประสาน

ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (γ_i) = 1.1 สำหรับโครงสร้างที่ต้องการอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษา 15 ปีขึ้นไป

เนื่องจากใช้น้ำประปา และทรายแม่น้ำในการหล่อคอนกรีต และไม่มีการใช้สารผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ ดังนั้น ไม่มีคลอไรด์ที่ผสมอยู่ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น $Cl_{do} = 0$

ดังนั้น ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริม (แพร่มาจากสภาพแวดล้อม) (Cl_d)

$$Cl_d < \frac{Cl_{lim}}{\gamma_i}$$

$$Cl_d < \frac{0.4}{1.1}$$

$$Cl_d < 0.364 \quad \text{-----(1)}$$

จากสมการ (5.1-ข)

$$Cl_d = \frac{Cl_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{C_{min}}{2\sqrt{D_a \times t_r}} \right) \right]}{B} \times 100$$

เนื่องจากโครงสร้างต้องเผชิญกับสภาวะน้ำขึ้น-ลง ดังนั้น จากตารางที่ 7 $Cl_s = 13.0$ กก./ม.³

และ ออกแบบคอนกรีตให้มีน้ำหนักวัสดุประสาน (B) = 350 กก./ม.³

$$\left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{C_{min}}{2\sqrt{D_a \times t_r}} \right) \right] = \frac{Cl_d \times B}{Cl_s \times 100} = \frac{0.364 \times 350}{13 \times 100} = 0.098$$

$$\operatorname{erf} \left(\frac{C_{min}}{2\sqrt{D_a \times t_r}} \right) = 1 - 0.098 = 0.902$$

$$\therefore \left(\frac{C_{min}}{2\sqrt{D_a \times t_r}} \right) = 1.17$$

$$\sqrt{D_a} = \left(\frac{C_{min}}{2 \times 1.17 \sqrt{t_r}} \right) = \left(\frac{6.5}{2 \times 1.17 \sqrt{20}} \right) = 0.621$$

ยกกำลังสองทั้งสองข้างของสมการ

$$\therefore D_a = 0.621^2 = 0.386 \quad \text{-----}(2)$$

จากสมการ (5.1-ค) $D_a = \gamma_c \cdot D_k + (w/l) \cdot (w/w_a)^2 \cdot D_0$

จากตารางที่ 5 ในสภาวะเสี่ยงต่อการเกิดสนิมรุนแรง

ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวที่มากที่สุดที่ยอมให้ได้ (w_a) สำหรับเหล็กเสริมทั่วไป = 0.0035 x 65

$$= 0.23 \text{ มม.}$$

ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว (w) = 0.23 มม. สมมติให้มีค่าเท่ากับขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวที่มากที่สุดที่ยอมให้ได้ (w_a) (คำนวณได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยผลของน้ำหนักบรรทุก)

สมมุติระยะห่างโดยเฉลี่ยของรอยแตกร้าว (l) = 300 มม. (คำนวณได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยผลของน้ำหนักบรรทุก)

สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ (D_0) ในคอนกรีตแตกร้าว = 200 ซม.²/ปี

ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (γ_c) = 1.3 สำหรับคอนกรีตทั่วไป

$$D_a = (1.3 \times D_k) + [(0.23 / 300)(0.23 / 0.23)^2(200)]$$

$$\therefore D_a = 1.3 D_k + 0.153 \quad \text{-----}(2)$$

$$(2) = (3) \quad 0.386 = 1.3 D_k + 0.153$$

$$\therefore D_k = (0.386 - 0.153) / 1.3 = 0.179$$

จากรูปที่ 1 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง D_k กับ w/b

$$D_k = 0.179 \text{ จะได้ } w/b = 0.465$$

สรุป การออกแบบคอนกรีตให้มีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ของโครงสร้างในสภาพแวดล้อมดังกล่าว โดยมีอายุการใช้งานปลอดภัยการบำรุงรักษา 20 ปี และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 1 ล้วน โดยไม่มีการแทนที่ด้วยเกลือ ต้องใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไม่เกิน 0.465 โดยมีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 65 มม.

ตัวอย่างที่ 3

การคำนวณค่าการหดตัวแบบบอโตจีเนียสที่อายุ 7, 30 และ 60 วัน ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3

วิธีคำนวณ

ค่าการหดตัวแบบบอโตจีเนียสของคอนกรีตตั้งแต่เริ่มก่อตัวจนถึงอายุ t ($\varepsilon'_{as}(t)$) สามารถคำนวณได้จากสมการ (6.2-ข)

$$\varepsilon'_{as}(t) = \gamma_b \varepsilon'_{as\infty} \left[1 - \exp \left\{ -a(t - t_s)^b \right\} \right]$$

เนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยในประเทศไทย เท่ากับ 30°C ดังนั้นต้องปรับแก้อายุของคอนกรีต t เนื่องจากผลของอุณหภูมิ โดยใช้สมการ (6.1-ค)

$$\text{ดังนั้น } t \text{ (7 วัน)} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T_i / T_0} \right]$$

$$= 7 \times \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + 30} \right]$$

$$= 11 \text{ วัน}$$

$$t \text{ (30 วัน)} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T_i / T_0} \right]$$

$$= 30 \times \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + 30} \right]$$

$$= 47 \text{ วัน}$$

$$t \text{ (60 วัน)} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T_i / T_0} \right]$$

$$= 60 \times \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + 30} \right]$$

$$= 94 \text{ วัน}$$

โดยระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (t_s) สมมติให้เท่ากับ 1 วัน

ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ = 0.3

ค่าการหดตัวแบบบอโตจีเนียสสุดท้าย ($\varepsilon'_{as\infty}$) สามารถคำนวณได้จากสมการ (6.2-ค) ดังนี้

$$\varepsilon'_{as\infty} = 3070 \exp \{ -7.2(W / C) \}$$

$$= 3070 \exp (-7.2 \times 0.3)$$

$$= 354 \text{ ไมครอน}$$

กรณีใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ล้วน ดังนั้น $\gamma_b = 1$

จากตารางที่ 12 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ = 0.3 ดังนั้น $a = 0.6$ และ $b = 0.5$

ดังนั้น ค่าการหดตัวแบบบอโตยีเนยสของคอนกรีตตั้งแต่เริ่มก่อตัวจนถึงอายุ 7 วัน ($\varepsilon'_{as}(7)$)

$$\varepsilon'_{as}(7) = 1 \times 354 \left[1 - \exp\{-0.6(11-1)^{0.5}\} \right] = 301 \text{ ไมครอน}$$

ค่าการหดตัวแบบบอโตยีเนยสของคอนกรีตตั้งแต่เริ่มก่อตัวจนถึงอายุ 30 วัน ($\varepsilon'_{as}(30)$)

$$\varepsilon'_{as}(30) = 1 \times 354 \left[1 - \exp\{-0.6(47-1)^{0.5}\} \right] = 348 \text{ ไมครอน}$$

ค่าการหดตัวแบบบอโตยีเนยสของคอนกรีตตั้งแต่เริ่มก่อตัวจนถึงอายุ 60 วัน ($\varepsilon'_{as}(60)$)

$$\varepsilon'_{as}(60) = 1 \times 354 \left[1 - \exp\{-0.6(94-1)^{0.5}\} \right] = 353 \text{ ไมครอน}$$

ตัวอย่างที่ 4

การคำนวณค่าการหดตัวแบบแห้งของพื้นคอนกรีตที่อายุ 30 และ 60 วัน ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.65 (ปริมาณน้ำต่อลบ.ม. ของคอนกรีตเท่ากับ 180 กก./ลบ.ม.) และเริ่มเผชิญกับสภาวะแห้งที่มีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 75% หลังจากการบ่ม 7 วัน โดยพื้นคอนกรีตมีอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวซึ่งสัมผัสอากาศของโครงสร้างคอนกรีต (V/S) = 150 มม.

วิธีคำนวณ คอนกรีตมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ไม่เกิน 55 MPa เลือกใช้สมการ (6.1-ก) ในการคำนวณหา ค่าการหดตัวแบบแห้ง

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = \left[1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\} \right] \cdot \varepsilon'_{sh}$$

เนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยในประเทศไทย เท่ากับ 30°C ดังนั้นต้องปรับแก้อายุของคอนกรีต t และ t_0 เนื่องจากผลของอุณหภูมิ โดยใช้สมการ (6.1-ค)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } t_0 \text{ (7 วัน)} &= \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T_i / T_0} \right] \\ &= 7 \times \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + 30} \right] \\ &= 11 \text{ วัน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t \text{ (30 วัน)} &= \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T_i / T_0} \right] \\ &= 30 \times \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + 30} \right] \\ &= 47 \text{ วัน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t \text{ (60 วัน)} &= \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T_i / T_0} \right] \\ &= 60 \times \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + 30} \right] \\ &= 94 \text{ วัน} \end{aligned}$$

ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) = 75%

ปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต (W) = 180 กก./ลบ.ม.

อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวซึ่งสัมผัสอากาศของโครงสร้างคอนกรีต (V/S) = 150 มม.

ค่าการหดตัวสุดท้าย (ε'_{sh}) สามารถคำนวณได้จากสมการ (6.1-ข) ดังนี้

$$\begin{aligned}\varepsilon'_{sh} &= -500 + 780 \left[1 - \exp \left(\frac{RH}{100} \right) \right] + 380 \log_e W - 50 \left[\log_e \left(\frac{V/S}{10} \right) \right]^2 \\ \varepsilon'_{sh} &= -500 + 780 \left[1 - \exp \left(\frac{75}{100} \right) \right] + 380 \log_e (180) - 50 \left[\log_e \left(\frac{150}{10} \right) \right]^2 \\ &= 235 \text{ ไมครอน}\end{aligned}$$

ค่าการหดตัวของคอนกรีตที่อายุ 30 วัน (บ่ม 7 วันแล้วจึงปล่อยให้เผชิญสภาวะแห้ง) ($\varepsilon'_{cs}(30,7)$)

$$\varepsilon'_{cs}(30,7) = \left[1 - \exp \left\{ -0.108(47-11)^{0.56} \right\} \right] \times 235 = 130 \text{ ไมครอน}$$

ค่าการหดตัวของคอนกรีตที่อายุ 60 วัน (บ่ม 7 วันแล้วจึงปล่อยให้เผชิญสภาวะแห้ง) ($\varepsilon'_{cs}(60,7)$)

$$\varepsilon'_{cs}(60,7) = \left[1 - \exp \left\{ -0.108(94-11)^{0.56} \right\} \right] \times 235 = 170 \text{ ไมครอน}$$
